УДК 621.7.07

А. А. Пермяков, Е. А. Фролов,
О. В. Бондарь

Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния базовых плит универсально-сборных переналаживаемых сварочных приспособлений

Национальный технический университет
«Харьковский политехнический институт»
Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка

Проведены экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния базовых плит переналаживаемых сварочных универсально-сборных приспособлений на натурных образцах методом непосредственных измерений вертикальных перемещений и осевых напряжений, возникающих в образцах, при нагружении их изгибающими моментами. Установлено, что введение в конструкцию плит промежуточных ребер жесткости выравнивает характер распределения вертикальных перемещений и значительно снижает их абсолютные максимальные значения.

Ключевые слова: переналаживаемые универсально-сборные приспособления, сборочно-сварочные процессы, базовая плита, напряженно-деформированное состояние, напряжение, вертикальное перемещение, ребро жесткости.

Введение

В развитии современного машиностроения сварочное производство играет важную роль. От его эффективности во многом будет зависеть формирование стабильно развивающегося промышленного сектора экономики страны и выпуск конкурентоспособной продукции отечественными предприятиями.

Особого внимания заслуживает процесс сборки конструкций под сварку. Сборка является одной из наиболее ответственных операций. Сборочная операция при изготовлении сварных конструкций должна обеспечивать правильное взаимное расположение и закрепление деталей собираемого изделия.

В настоящее время производство сварных конструкций изделий машиностроительного комплекса требует применения значительного количества неразборных сборочно-сварочных приспособлений. В период подготовки производства для новых изделий в результате конструктивно-технологических изменений около 40% изготовленной неразборной оснастки приходится проектировать и изготавливать заново, что влечет за собой дополнительные расходы металла, трудовые и финансовые затраты. Использование переналаживаемой сборочно-сварочной оснастки позволяет повысить производительность труда, обеспечить заданную технологическим процессом точность, улучшить качество получаемых сварных конструкций.

1. Постановка проблемы, анализ последних исследований и публикаций

По данным ряда работ [1–5] при переподготовке производства и освоении выпуска новых видов продукции наибольший эффект достигается за счет использования переналаживаемых видов технологической оснастки, поскольку она основана на принципе длительной обращаемости и высокой оборачиваемости ее составных элементов.

Конструкция базовых плит универсальных сборно-разборных приспособлений для сборки под сварку (УСРПС) представляет собой тонкую перфорированную пластину, обрамленную по периметру жесткой рамкой (рис. 1).

Рис. 1. Конструктивные исполнения базовых плит УСРПС

Практически базовые плиты выполняются с промежуточными ребрами, которые определенным образом влияют на параметры напряженно-деформированного состояния (НДС). Теоретическими методами это влияние трудно установить из-за трудоемкости применяемых решений.

Цель работы – экспериментально оценить степень влияния на НДС базовой плиты промежуточных ребер жесткости.

2. Методика проведения исследований

Экспериментальные исследования НДС проводились на натурных образцах плит методом непосредственных измерений вертикальных перемещений и осевых напряжении образцов при нагружении их изгибающими моментами [6–8].

Вертикальные перемещения поверхности исследуемых образцов регистрировались в определенных точках при помощи индикаторов часового типа ИЧ-10 с ценой деления измерительной шкалы, равной 10 мкм. Индикаторы устанавливались и закреплялись в специальной оправке, изготовленной из органического стекла, которая независимо базировалась на поверхности стендового основания над исследуемым образцом базовой плиты. Схема расположения точек измерения вертикальных перемещений на поверхности натурного образца базовой плиты и общий вид индикаторной оправки с установленными в ней индикаторами показаны на рис. 2 и 3.

Величины напряжений, возникающих при деформировании натурных образцов базовых плит, определяли методом статического тензометрирования при помощи датчиков активного сопротивления типа 2ПКБ-5-50. В связи с симметричностью исследуемых базовых плит относительно поперечной оси тензометрирование производилось только на одной половине натурного образца. На второй половине образца при этом размещалось по несколько контрольных датчиков. Датчики располагались, преимущественно, на перемычках параллельно направлению координатных осей, что обеспечило регистрацию максимальных значений нормальных осевых напряжений в наиболее нагруженных участках конструкции, в том числе и в районе точек измерения вертикальных перемещений.

Всего на каждый натурный образец базовой плиты устанавливалось по 32 тензодатчика. В качестве регистрирующей аппаратуры использовался цифровой тензометрический мост ЦТМ-3 с переключателем датчиков ПД-100.

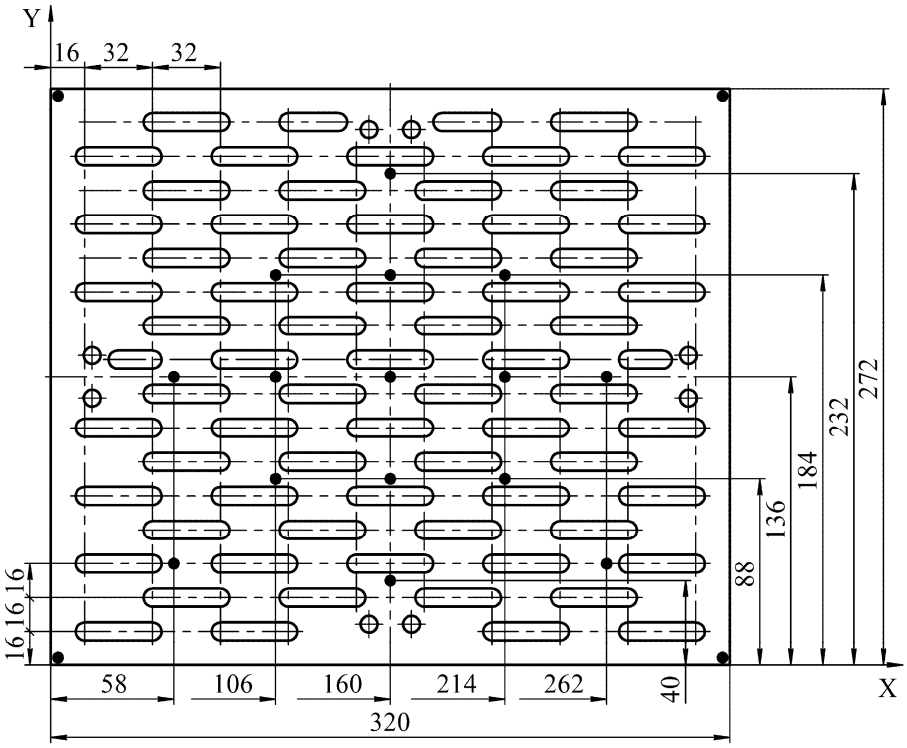

Рис. 2. Схема расположения тензодатчиков и точек измерения вертикальных перемещений

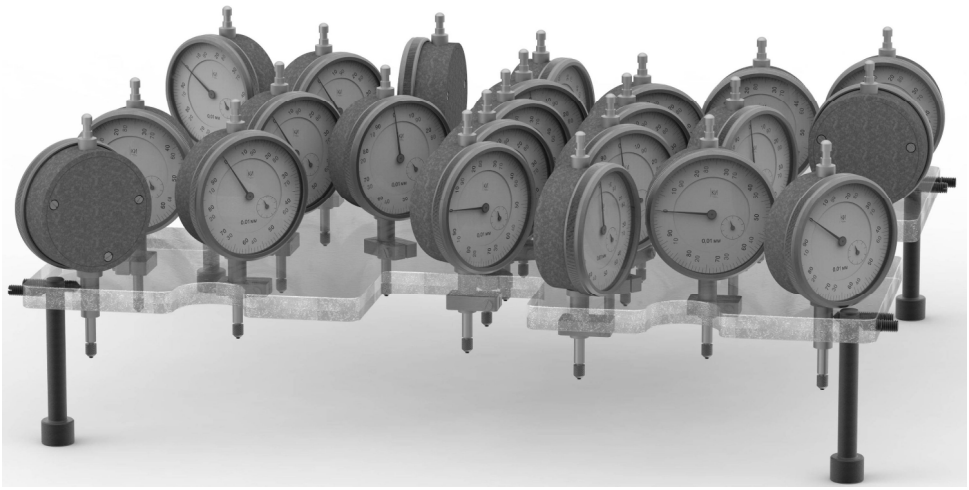

Рис. 3. Индикаторная оправка с индикаторами

Перевод показаний цифрового тензометрического моста (далее по тексту прибора ЦТМ-3) в соответствующие значения нормальных напряжений производился по формуле

$$\sigma_{x,y} = \delta e, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где δ – разность отсчетов по прибору ЦТМ-3 до и после нагружения испытуемого образца в единицах относительной деформации (е.о.д);

e – переводной (тарировочный) коэффициент используемого прибора ЦТМ-3 в МПа на единицу относительной деформации.

Значение переводного коэффициента для используемого в экспериментах прибора ЦТМ-3 установлено с помощью тарировочной балки, представляющей собой балку равного сопротивления с наклеенными на ее основание четырьмя тензодатчиками 2ПКБ-5-50. Датчики подключали к тарируемому прибору и с их помощью фиксировали относительную деформацию балки при ее нагрузке силой P_i.

Относительная деформация тарировочной балки по показаниям прибора ЦТМ-3 и расчетное напряжение от силы P_i, действующее в местах наклейки тензодатчиков, на основании формулы (1) определялись как

$$e = \sigma_i / \delta_i, \quad (2)$$

где σ_i – расчетное напряжение от силы P_i по сечению тарировочной балки в местах наклейки тензодатчиков, МПа;

δ_i – показание прибора ЦТМ-3, соответствующее значению σ_i, е.о.д.

Расчетное значение σ_i определяли по табулированной в сопротивлении материалов формуле [9]

$$\sigma_i = 6P_i l / bh^2, \quad (3)$$

где P_i – сила, действующая на тарировочную балку, Н;

l – расстояние от места приложения силы P_i до средины наклеенного тензодатчика, см;

b, h – соответственно ширина и толщина тарировочной балки, см.

Нагружение исследуемых натурных образцов производилось специально разработанным и изготовленным нагрузочным устройством (рис. 4).

Натурные образцы выполнялись по максимальным размерам базовых плит УСРПС серии 1 (размеры в плане 272×320 мм) и имели три конструктивных исполнения (рис. 5).

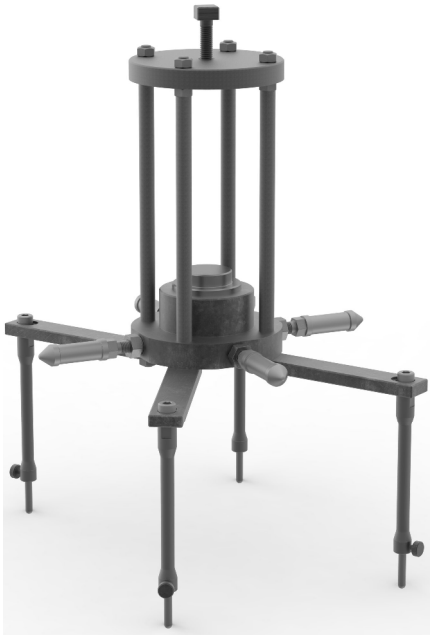

Рис. 4. Общий вид нагрузочного устройства

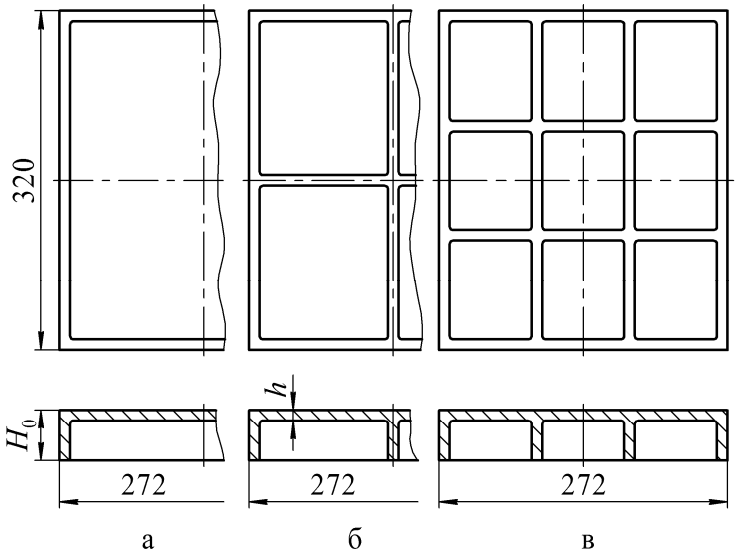

Рис. 5. Схемы исполнения натурных образцов: а – без промежуточных ребер жесткости; б – с двумя центрально расположенными ребрами жесткости; в – с двумя парами симметрично расположенных ребер жесткости

Толщина перфорированной пластины h, и высота ребер жесткости H_0 в ходе экспериментов варьировалась в сочетаниях, соответствующих условиям теоретических исследований, а именно:

– при постоянной толщине перфорированной пластины h = 9 мм высота ребер H_0 принимала значение 35, 48, 57 и 63 мм;

– при постоянной высоте ребер жесткости H_0 = 35 мм толщина пластины h принимала значение 9, 11, 23 и 15 мм.

Натурные образцы изготавливались из стали марки 40Х с термообработкой до твердости 40–44 $HRC_э$.

На образцах исполнения «а» (см. рис. 5) исследовалось влияние размеров h и H_0 на НДС базовых плит, отрабатывались и проверялись результаты теоретических исследований; на образцах исполнений «б» и «в» исследовано влияние на НДС промежуточных ребер жесткости. При этом исследования проводились на образцах с неотъемными и отъемными ребрами жесткости.

В ходе экспериментов натурные образцы с наклеенными на них тензодатчиками устанавливались и базировались на стендовом основании, роль которого выполняла плита УСП-12 с размерами 360×360×60 мм. После этого на стендовое основание последовательно устанавливались и базировались оправка с индикаторами и нагрузочное устройство (рис. 6).

Исследования с регистрацией показаний индикаторов и прибора ЦТМ-3 выполнялся для трех видов нагружения натурных образцов, схемы которых приведены на рис. 7:

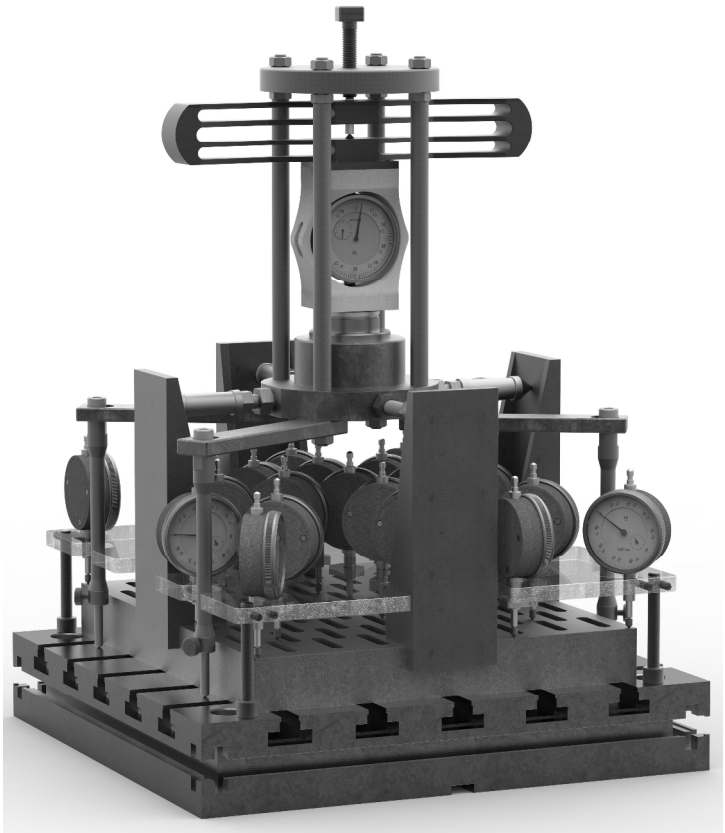

Рис. 6. Натурный образец плиты и индикаторная оправка в нагрузочном устройстве

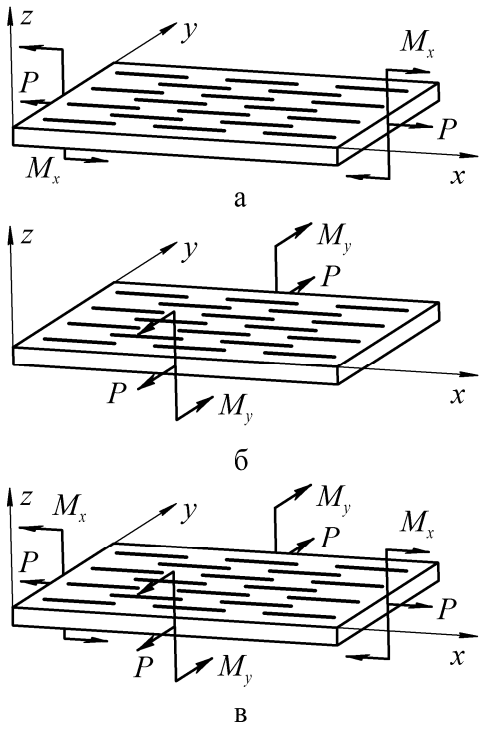

Рис. 7. Схемы нагружения базовых плит

а – продольное нагружение: изгибающие моменты M_x приложены на краях в плоскости, проходящей через продольную ось симметрии образца (плиты);

б – поперечное нагружение: изгибающие моменты M_y приложены на краях в плоскости, проходящей через средину образца перпендикулярно продольной оси симметрии;

в – двухосное нагружение: изгибающие моменты $M_x = M_y$ – приложены на краях и действуют в продольном и поперечном направлениях одновременно.

3. Результаты исследований

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить картину напряженного состояния и деформирования поверхности исследуемых натурных образцов базовых плит.

На рис. 8 и рис. 9 показаны наиболее характерные распределения осевых напряжений σ_x, σ_y вдоль центральных осей при продольном, поперечном и двухосном нагружении изгибающими моментами натурных образцов базовых плит с постоянной толщиной пластины h = 9,0 мм и изменяемой высотой окаймляющего ребра H_0, принимающей значения 35, 48, 57 и 63 мм (на графиках обозначены цифрами 1–4 в порядке возрастания их значений). На этих и последующих графиках координатные оси приняты совпадающими с центральными осями натурных образцов.

Из рисунков видно, что с увеличением высоты окаймляющего ребра H_0 величины действующих осевых напряжений σ_x, σ_y снижаются, а графические зависимости, характеризующие их распределение, становятся более гладкими. Максимальные значения напряжений σ_x, σ_y наблюдаются вблизи мест приложения нагрузок, то есть по краям испытуемых натурных образцов. Исключение представляют распределения $\sigma_x = f(x)$ при поперечном (рис. 8, б) и $\sigma_y = \varphi(x, y)$ продольном (рис. 9, а, б) вариантах нагружения. Но в этих случаях величины осевых напряжений совершенно незначительны. Абсолютный максимум напряжений наблюдается вдоль оси x для образцов с высотою окаймляющего ребра H_0 = 35 мм при продольном (рис. 8, а) и двухосном (рис. 8, г) вариантах нагружения, но его величина (σ_x = 52–58 МПа) намного ниже предела текучести стали марки 40Х ($\sigma_т$ = 637 МПа), из которой изготовлены натурные образцы, и за предел текучести стали марки 40ХЛ ($\sigma_т$ = 520 МПа), рекомендуемой для промышленного изготовления базовых плит.

Также наиболее характерные зависимости, построенные по усредненным значениям результатов исследования, показаны на рисунках 10–14. На каждом рисунке показан один из вариантов нагружения натурных образцов с определенным сочетанием изменяемых параметров исследования.

Для всех вариантов нагружения натурных образцов и всех сочетаний изменяемых параметров исследования распределение напряжений обладает хорошей симметрией относительно оси y = 128 мм и незначительной асимметрией относительно оси x = 160 мм, что объясняется отсутствием геометрической симметрии натурных образцов относительно продольной оси. При этом характерным является образование в центральной части образцов зоны сжатия по напряжениям при поперечном (рис. 9, в) и двухосном (рис. 9, г) вариантах нагружения и расширение этой зоны с увеличением высоты окаймляющего ребра H_0. В остальных случаях действующие в исследуемых образцах напряжения являются напряжениями растяжения.

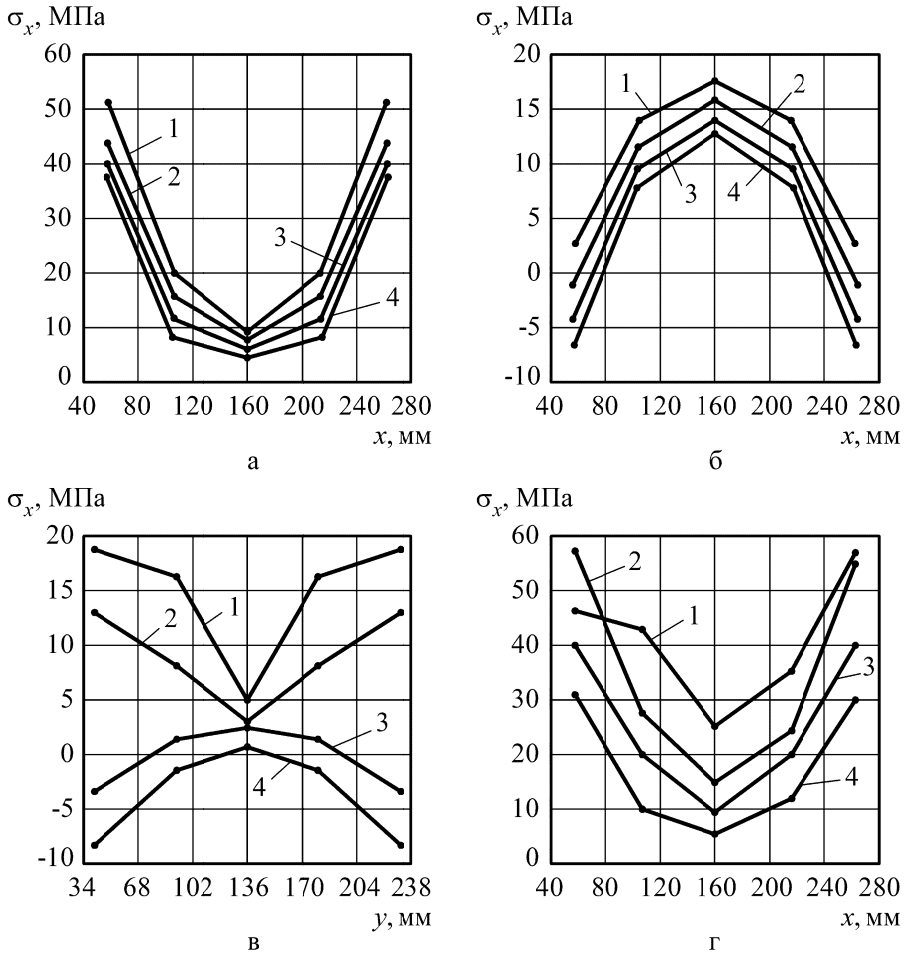

Рис. 8. Характерные распределения напряжений σ_x в зависимости от изменения высоты ребра H_0: а – продольное нагружение; б, в – поперечное нагружение; г – двухосное нагружение моментами: 1 – образец базовой плиты с высотой окаймляющего ребра H_0 = 35 мм; 2 – то же, при H_0 = 48 мм; 3 – то же, при H_0 = 57 мм; 4 – то же, при H_0 = 63 мм

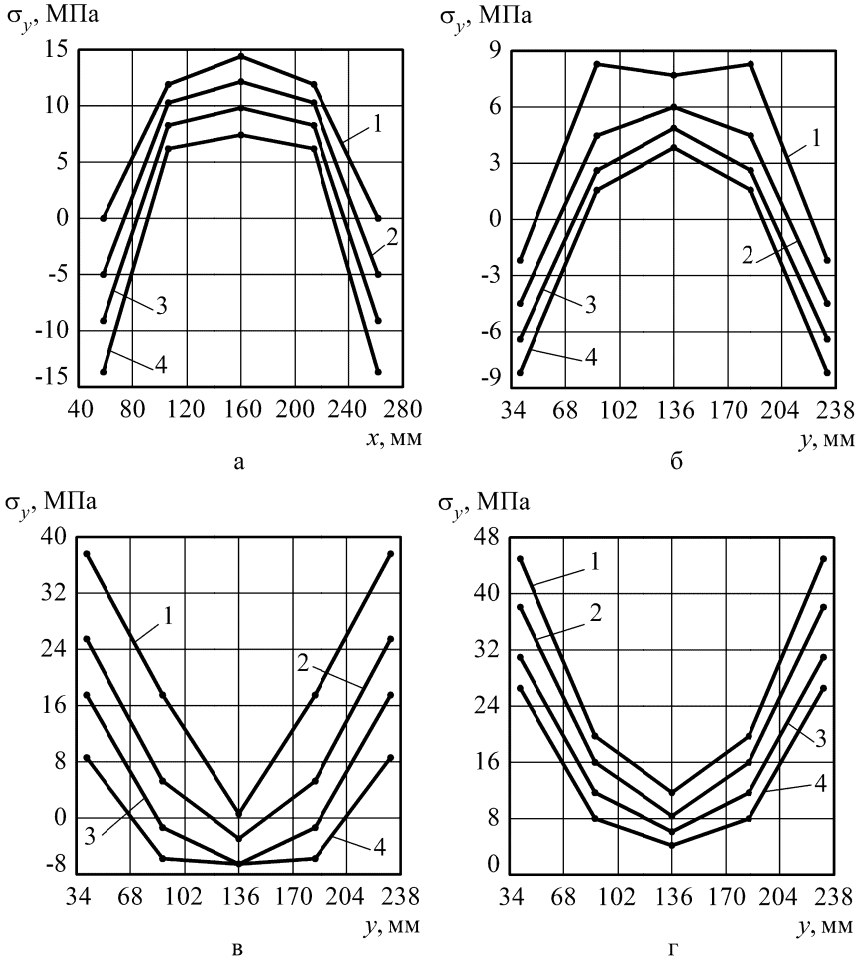

Рис. 9. Характерные распределения напряжений σ_y в зависимости от изменения высоты ребра H_0: а, б – продольное нагружение; в – поперечное нагружение; г – двухосное нагружение моментами: 1 – образец базовой плиты с высотой окаймляющего ребра H_0 = 35 мм; 2 – то же, при H_0 = 48 мм; 3 – то же, при H_0 = 57 мм; 4 – то же, при H_0 = 63 мм

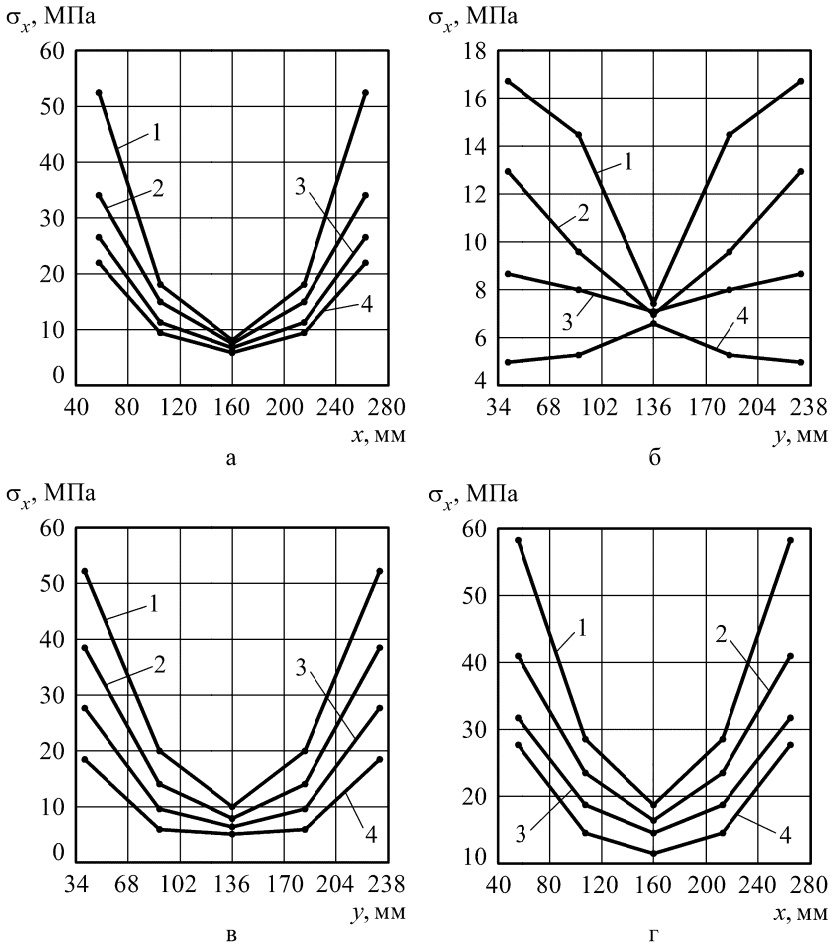

Рис. 10. Характерные распределения напряжений σ_x в зависимости от изменения толщины пластины h: а, б – продольное нагружение; в – поперечное нагружение; г – двухосное нагружение моментами: 1 – образец базовой плиты с толщиной пластины h = 9 мм; 2 – то же, при h = 11 мм; 3 – то же, при h = 13 мм; 4 – то же, при h = 15 мм

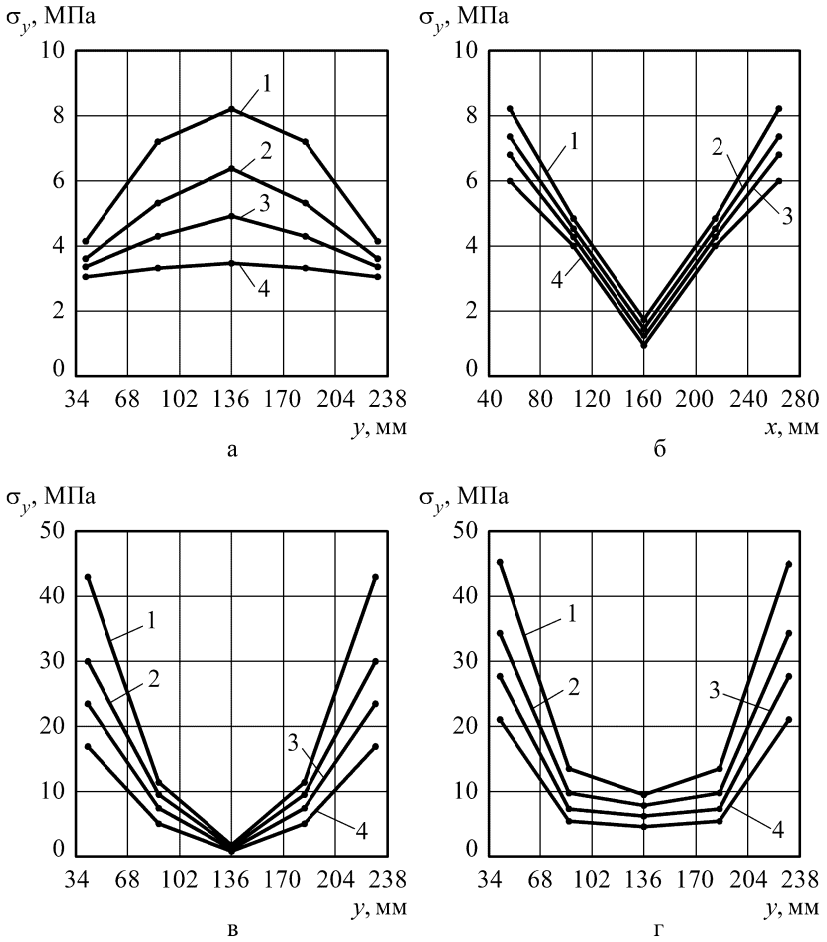

Рис. 11. Характерные распределения напряжений σ_y в зависимости от изменения толщины пластины h: а – продольное нагружение; б, в – поперечное нагружение; г – двухосное нагружение моментами: 1 – образец базовой плиты с толщиной пластины h = 9 мм; 2 – то же, при h = 11 мм; 3 – то же, при h = 13 мм; 4 – то же, при h = 15 мм

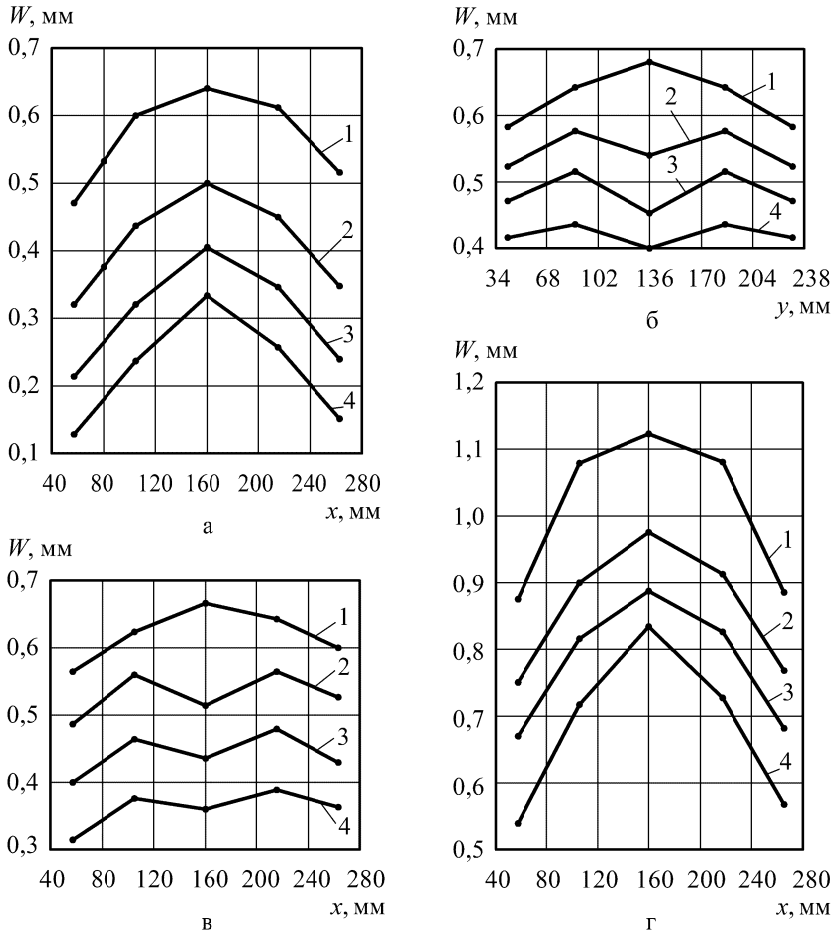

Рис. 12. Характерные распределения вертикальных перемещений в зависимости от изменения высоты ребра H_0:
а, б – поперечное нагружение; в – продольное нагружение; г – двухосное нагружение моментами:
1 – образец базовой плиты с высотой окаймляющего ребра H_0 = 35 мм; 2 – то же, при H_0 = 48 мм;
3 – то же, при H_0 = 57 мм; 4 – то же, при H_0 = 63 мм

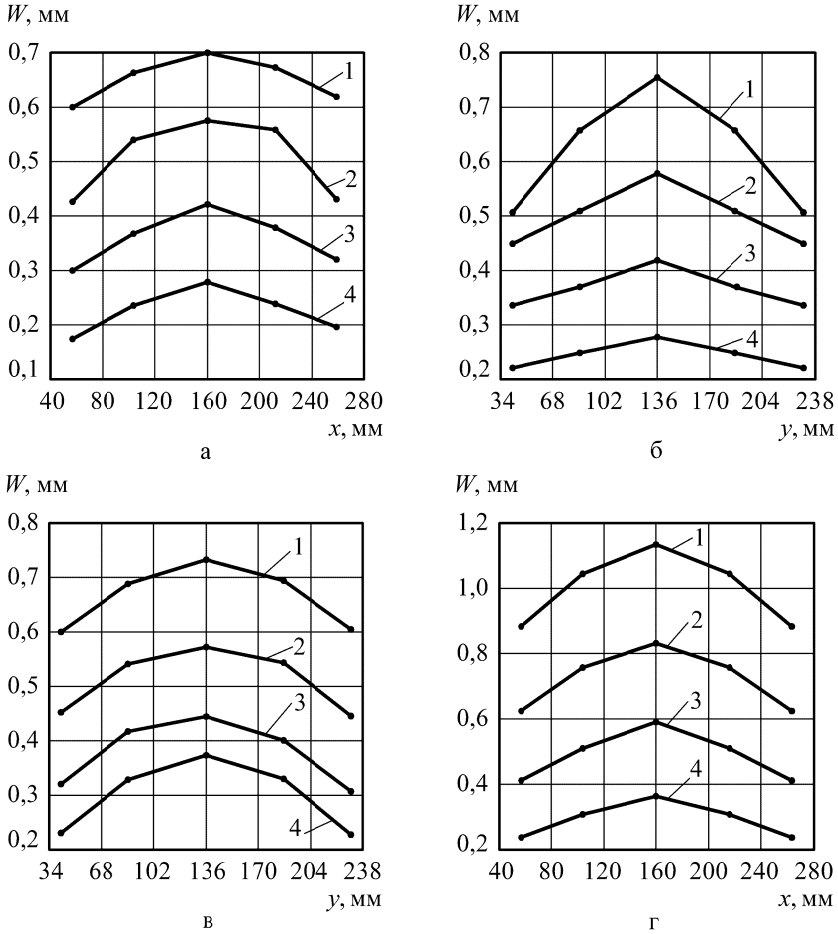

Рис. 13. Характерные распределения вертикальных перемещений в зависимости от изменения толщины пластины h:
а, б – продольное нагружение; в – поперечное нагружение; г – двухосное нагружение моментами:
1 – образец базовой плиты с толщиной пластины h = 9 мм; 2 – то же, при h = 11 мм;
3 – то же, при h = 13 мм; 4 – то же, при h = 15 мм

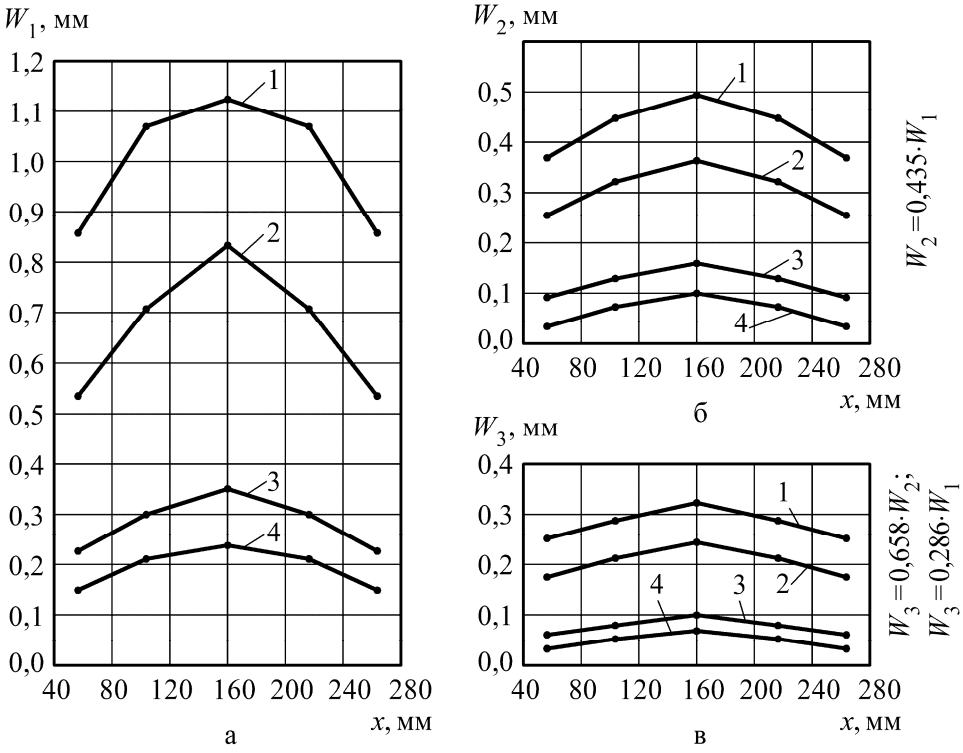

Рис. 14. Распределение вертикальных перемещений *W* в зависимости от расположения промежуточных ребер жесткости

На рисунках 10 и 11 приведены графики распределения характерных осевых напряжений σ_x, σ_y вдоль центральных осей при продольном, поперечном и двухосном нагружении изгибающими моментами натурных образцов базовых плит с постоянной высотой окаймляющего ребра H_0 = 35 мм и изменяемой толщиной пластины *h*, принимающей поочередно значения 9, 11, 13 и 15 мм (на графиках обозначено цифрами 1–4 в порядке возрастания значений *h*).

Из графиков видно, что рост толщины пластины *h* снижает уровень осевых напряжений σ_x, σ_y в соответствующих сечениях не изменяя при этом характера распределения напряжений. Максимальные значения напряжений наблюдаются на краях испытуемых образцов, т. е. в местах приложения нагрузок. Их наибольшие показатели (σ_x = 53–59 МПа) зафиксированы при продольном (рис. 10, а) и двухосном (рис. 10, г) вариантах нагружения натурных образцов с минимальной толщиной пластины *h* = 9,0 мм. В остальном, характер распределения осевых напряжений σ_x, σ_y аналогичен характеру вышерассмотренных распределений, приведенных на рисунках 8 и 9.

Анализ напряженного состояния исследуемых образцов базовых плит показал, что абсолютные значения действующих напряжений в 8,8–9,8 раза ниже предела пропорциональности материала базовых плит. Это говорит о том, что при рассмотренных вариантах нагружения исследуемые образцы плит обладают весьма высоким запасом прочности, а критерием их работоспособности следует считать жесткость, характеризуемую величиной вертикальных перемещений *W*.

Наиболее характерные распределения вертикальных перемещений *W* точек, лежащих на центральных осях, при всех вариантах нагружения натурных образцов базовых плит с изменяемой высотою окаймляющего ребра H_0 (35, 48, 57 и 63 мм) и постоянной толщиною пластины *h* = 9,0 мм показаны на рис. 12, а для

образцов с изменяемой толщиною пластины h (9, 11, 13 и 15 мм) и постоянной высотою окаймляющего ребра H_0 = 35 мм – на рис. 13.

Из рисунков видно, что максимальные перемещения W возникают в центральной части исследуемых образцов при двухосном варианте их нагружения (рис. 12, г и рис. 13, г). Наибольшие их значения зафиксирован у образцов с минимальною высотою окаймляющего ребра H_0 = 35 мм и минимальной толщиною пластины h = 9,0 мм и составляют 1,17 мм. С увеличением размеров H_0 и h абсолютный максимум вертикальных перемещений W снижается до 0,48 мм, а характер распределения становится более гладким.

Для всех вариантов нагружения натурных образцов и всех сочетаний изменяемых параметров исследования наблюдается большая общность характера распределения вертикальных перемещений W. При этом распределение перемещений относительно оси y = 128 мм строго симметрично и несколько асимметрично относительно оси x = 160 мм. Характерной особенностью деформированного состояния является локальное снижение перемещений W в центральной части образцов с высотою окаймляющего ребра $H_0 \geq 48$ мм при толщине пластины h, равной 9,0 и 11,0 мм. Следует также отметить, что это явление наблюдается только при одноосном варианте нагружения испытуемых образцов.

Анализ зависимостей деформированного состояния показывает, что исследованные варианты натурных образцов базовых плит обладают высокой деформируемостью, уровень которой можно существенно снизить путем введения в конструкцию плит промежуточных ребер жесткости.

Влияние промежуточных ребер жесткости на деформированное состояние поверхности базовых плит показано на рис. 14. Исследование проводилось при двухосном нагружении натурных образцов базовых плит с предельными сочетаниями размеров H_0 и h, т. е. при H_0 = 35 мм и h = 9 мм (кривая 1); при H_0 = 63 мм и h = 9 мм (кривая 2), при H_0 = 35 мм и h = 15 мм (кривая 3) и при H_0 = 63 мм и h = 15 мм (кривая 4). Для наглядности и удобства сопоставления результатов на рис. 14 приведены распределения вертикальных перемещений для случаев: а – натурные образцы базовых плит без промежуточных ребер жесткости (см. рис. 5, а); б – натурные образцы базовых плит с двумя центрально-расположенными взаимно перпендикулярными ребрами жесткости (см. рис. 5, б); в – натурные образцы базовых плит с двумя парами симметрично расположенных взаимно перпендикулярных ребер жесткости (см. рис. 5, в).

Из приведенных графических зависимостей видно, что введение в конструкцию базовых плит промежуточных ребер жесткости выравнивает характер распределения вертикальных перемещений W и снижает их абсолютный максимум в 2,3 раза при расположении ребер жесткости по схеме «б» и в 3,5 раза – при расположении ребер жесткости по схеме «в». Исполнение ребер жесткости отъемными повышает абсолютные показатели перемещений по сравнению с аналогичными их значениями для образцов с неотъемными ребрами жесткости на 10…15%.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований НДС базовых плит установлено:

1. Картины распределения осевых напряжений σ_x, σ_y и вертикальных перемещений W практически симметричны относительно центральных осей базовых плит.

2. Максимальные значения вертикальных перемещений *W* наблюдаются по центру базовых плит, а осевых напряжений σ_x, σ_y – в местах приложения нагрузки, т. е. по краям базовых плит.

3. Наибольших значений осевые напряжения и вертикальные перемещения достигают при двухосном нагружении базовых плит изгибающими моментами.

4. Действующие на поверхности базовых плит напряжения являются, в основном, напряжениями растяжения. Их предельные значения в 8,8–9,8 раза ниже предела пропорциональности материала базовых плит (40ХЛ, $\sigma_т$ = 520 МПа).

5. Учитывая низкий уровень действующих в плитах напряжений, критерием их работоспособности следует считать жесткость, характеризуемую величиной вертикальных перемещений (прогибов) поверхности плит.

6. Базовые плиты без промежуточных ребер жесткости обладают значительной деформируемостью. В зависимости от сочетания основных параметров плит показатели вертикальных перемещений их поверхности находятся в пределах 0,48–1,17 мм.

7. Введение в конструкцию базовых плит промежуточных ребер жесткости выравнивает характер распределения вертикальных перемещений и снижает их абсолютные максимумы в 2,3–3,5 раза.

Список литературы

1. Жолткевич, Н.Д. Отраслевая система переналаживаемой технологической оснастки для ускоренной технологической подготовки производства [Текст] / Н.Д. Жолткевич [и др.] – М.: ЦНИИ информ., 1988. – 248 с.

2. Филатов, Л.С. Система переналаживаемой технологической оснастки для сборочно-сварочного производства отрасли [Текст] / Л.С. Филатов // Прогрессивные виды универсально-сборной переналаживаемой оснастки: тез. докл. II отраслевой конф. – М.: 1987. – С. 20–25.

3. Ряховский, А.В. Состояние, перспективы и концепция развития переналаживаемой оснастки для гибких производственных систем [Текст] / А.В. Ряховский // Вестн. Харьк. гос. политехн. ун-та. – 1999. – С. 28–34.

4. Фролов, Е.А. Критерии оценки конструктивных и силовых параметров универсальных сварочных сборно-разборных приспособлений [Текст] / Е.А. Фролов, С.И. Кравченко, О.В. Бондарь // Авиационно-космическая техника и технология. – 2013. – № 3 (100). – С. 26–30.

5. Мовшович, А.Я. Конструкции универсальных сборно-разборных приспособлений для сборочно-сварочных работ (УСРП-С) / А.Я. Мовшович, К.А. Изотова, Ю.А. Черная, О.В. Бондарь // Машинобудування: зб. наук. пр. Української інженерно-пед. акад. – № 9. – Х., 2012. – С. 148–161.

6. Применение тензометрии в машиностроении [Текст] / под общ. ред. П.З. Петухова и А.В. Казанцева. – М. – Свердловск: Машгиз, 1956. – 210 с.

7. Григоровский, Н.И. Методы и средства определения полей деформаций и напряжений [Текст] / Н.И. Григоровский. – М.: Машиностроение, 1983. – 248 с.

8. Финк, К. Измерение напряжений и деформаций [Текст] / К. Финк, Х. Рорбах. – М.: Машгиз, 1961. – 315 с.

9. Феодосьев, В.И. Сопротивление материалов: учеб. для вузов [Текст] / В.И. Феодосьев. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

Поступила в редакцию 19.09.2017.

Експериментальне дослідження напружено-деформованого стану базових плит універсально-збірних переналагоджуваних зварних пристосувань

Проведено експериментальні дослідження напружено-деформованого стану базових плит переналагоджуваних зварних універсально-збірних пристосувань на натурних зразках методом безпосередніх вимірювань вертикальних переміщень та осьових напружень, що виникають у зразках, при навантаженні їх згинальними моментами. Встановлено, що наявність у конструкції плит проміжних ребер жорсткості вирівнює характер розподілу вертикальних переміщень і значно знижує їх абсолютні максимальні значення.

Ключові слова: переналагоджувані універсально-збірні пристосування, збірно-зварні процеси, базова плита, напружено-деформований стан, напруження, вертикальне переміщення, ребро жорсткості.

Stress-Strain State Experimental Study of Unified Assembled Reconfigurable Welding Equipment Base Plates

Stress-strain state experimental study of the adjustable welding unified equipment basic plates on full-scale specimens were carried out using the vertical movement and axial stress direct measurement method arising in the specimens, when they were exposed to bending moments. It has been revealed that introduction of intermediate stiffeners in the plate design equalizes the distribution pattern of vertical movements and significantly reduces their maximum absolute values.

Keywords: re-configurable unified assembled equipment, assembling and welding processes, base plate, stress-strain state, stress, vertical movement, stiffener.

Сведения об авторах:

Пермяков Александр Анатольевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения и металлорежущих станков, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина.

Фролов Евгений Андреевич – д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой технологии машиностроения, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина.

Бондарь Олег Валентинович – ассистент, Полтавский национальный технический университет имени Юрия Кондратюка, г. Полтава, Украина.